



L'économie spatiale connaît actuellement une profonde transformation. Le rythme de l'innovation n'a jamais été aussi soutenu, depuis la commercialisation rapide de l'orbite terrestre basse (LEO) jusqu'aux missions extraterrestres ambitieuses visant la Lune, Mars et même au-delà.

On attend désormais des équipes d'ingénieurs qu'elles réalisent rapidement des prototypes, procèdent à des itérations rapides et adaptent efficacement la production à plus grande échelle, tout en concevant des systèmes capables de résister à des années de fonctionnement dans certains des environnements les plus hostiles qui soient.

Même si vous maîtrisez la cinématique et que vous avez modélisé les exigences en matière de couple et de vitesse, la conception d'un système adapté à l'espace reste un véritable défi. Car il s'agit de savoir quelles décisions prises sur le terrain entraîneront des problèmes à 380 km d'altitude et au-delà ou à la surface d'une autre planète. Dans l'espace, le refroidissement par convection n'est pas possible. Les systèmes d'isolation standard se dégradent sous l'effet des radiations. Les matériaux qui fonctionnent parfaitement bien dans un laboratoire peuvent contaminer les systèmes optiques sensibles dans le vide.

Ce document aborde les choix spécifiques qui distinguent un prototype terrestre d'un système adapté à une utilisation spatiale, et explique comment prendre ces décisions suffisamment tôt pour qu'elles aient un impact significatif.



Principaux domaines des applications spatiales

L'espace n'est pas un environnement monolithique. Les différentes missions exposent les systèmes de mouvement à diverses conditions : vide, rayonnement, cycles thermiques, risque de contamination et durée de vie utile. La conception d'un « moteur spatial universel » est souvent à la fois inefficace sur le plan technique et irréaliste d'un point de vue économique.

Kollmorgen classe les applications spatiales en six domaines distincts en fonction des principaux facteurs de contrainte. Cette taxonomie permet d'aligner la conception du mouvement sur la réalité opérationnelle, évitant ainsi les erreurs catastrophiques dues à une conception sous-dimensionnée ou à une surconception coûteuse.

Tableau 1 : les six domaines du mouvement spatial

Domaine	Facteurs de contrainte	Implications conceptuelles	Degré de difficulté d'adaptation pour l'espace
Stations terrestres	Atmosphère standard, conditions météorologiques, cycles de fonctionnement 24 heures sur 24, 7 jours sur 7	Les composants prêts à l'emploi de qualité spatiale suffisent. On se concentre en priorité sur une disponibilité extrême, un suivi précis et l'étanchéité environnementale.	Faible – produit commercial standard ou légèrement modifié
Prototypage terrestre	Charge due à la gravité, aucun environnement extrême	Validation des profils de couple/vitesse et de l'empreinte mécanique à l'aide de servomoteurs standard sans boîtier. Conservation d'une architecture évolutive adaptée à l'espace.	Aucune – mais, ici, les choix architecturaux déterminent la facilité de mise à niveau
Orbite terrestre basse (LEO)	Vide poussé, cycles thermiques rapides (de -150 °C à +120 °C), érosion par oxygène atomique, rayonnements modérés	Conformité totale au dégazage sous vide requise. Revêtements résistants à l'oxygène atomique. L'intensité de la formule varie selon la durée de vie de la mission.	Faible à moyenne – la durée de vie de la mission (3 à 15 ans) détermine le besoin en termes d'adéquation à l'espace.
Espace lointain	Froid cryogénique extrême, rayonnements cosmiques intenses, missions de plusieurs années (+30 ans)	Conformité totale sous vide, lubrification cryogénique (MoS ₂), encapsulage exclusif résistant aux rayonnements. Moteur dimensionné pour la performance thermique.	Élevée – formule spatiale maximale
Habitat spatial	Atmosphère respirable, température modérée, proximité humaine, +30 ans de durée de vie	Dégazage critique pour l'intégrité atmosphérique. Souvent réalisable avec des moteurs commerciaux modifiés (la formule spatiale complète n'est pas toujours requise).	Moyenne – modifications spécifiques à l'application
Surfaces extraterrestres	Réglolite abrasif, gravité variable, fluctuations diurnes importantes, rayonnements extrêmes	Étanchéité mécanique, réduction de poussière, résilience thermique extrême. Le niveau le plus élevé : conçu pour une fiabilité absolue sans aucun entretien.	La plus élevée – formule spatiale entièrement personnalisée pour la mission

Le Tableau 1 définit également l'exposition aux coûts. Par exemple, un moteur commercial destiné au prototypage terrestre peut coûter une fraction du prix d'une conception cryogénique entièrement personnalisée et prête pour l'espace. L'une des décisions les plus déterminantes qu'une équipe d'ingénieurs puisse prendre dès le début du processus de conception consiste à adapter la « formule » à la mission.

Certifié pour l'espace ou prêt pour l'espace ?

Il existe des moteurs conçus pour une utilisation spatiale. Ils sont certifiés et documentés, et conçus pour résister à des conditions environnementales spécifiques. Cependant, si la mention « certifié pour l'espace » indique qu'un moteur peut fonctionner dans l'espace, cela ne signifie pas pour autant qu'il est optimisé pour une application spatiale spécifique.

Les exigences relatives à un moteur conçu pour un satellite en orbite terrestre basse (LEO) d'une durée de vie de quatre ans sont fondamentalement différentes de celles applicables à un véhicule lunaire évoluant sur la face cachée de la Lune. Même au sein du programme Artemis de la NASA, les conditions de fonctionnement varient considérablement en fonction de l'emplacement de la mission (côté jour ou côté nuit) et de l'exposition thermique. L'utilisation d'un moteur conçu pour une orbite terrestre basse (LEO) dans le cadre d'une mission sur une surface extraterrestre

pourrait entraîner une défaillance prématurée. À l'inverse, surdimensionner une mission LEO de courte durée en lui appliquant des spécifications destinées à l'espace lointain peut augmenter les coûts d'ingénierie non récurrents (NRE).

L'approche de Kollmorgen repose sur une architecture adaptée à l'espace, s'appuyant sur une base mécanique et électromagnétique éprouvée depuis plus de 60 ans, notamment dans le cadre du programme Gemini, des cinq générations de rovers martiens et d'autres programmes. Sur cette base, nous concevons conjointement une « formule spatiale » adaptée à un domaine, une mission, un environnement de rayonnement et une plage de cycles thermiques spécifiques. Il en résulte un système de mouvement conçu pour la mission, dont le parcours, du prototype terrestre au déploiement en orbite ou à bord d'un engin spatial, est clairement défini et validé.

Considérations essentielles en matière de conception

Une fois ce domaine défini, les ingénieurs doivent maîtriser les aspects physiques et la science des matériaux propres à l'environnement spatial. La conception des moteurs terrestres repose généralement sur un refroidissement par convection, des aimants au néodyme standard et une isolation à base de polymères. Or, ces trois scénarios ne s'appliquent pas dans l'espace.

Dégazage et environnement sous vide

Dans le vide poussé de l'espace (p. ex., 10^{-7} Torr), de nombreux matériaux de fabrication standard se subliment ou dégazent. Ces rejets gazeux peuvent se condenser sur les lentilles optiques sensibles, les panneaux solaires et les capteurs, compromettant ainsi gravement les capacités opérationnelles de la mission.

- **Norme de dégazage :** la norme NASA-STD-6016A fixe les limites acceptables en matière de dégazage. Les ingénieurs doivent tenir compte de deux valeurs principales : la perte de masse totale (TML) doit être inférieure à 1,0 % (souvent limitée strictement à < 0,5 % pour les systèmes optiques sensibles) et les matières condensables volatiles collectées (CVCM) doivent être < 0,1 %.
- **Risques liés aux matériaux :** les matériaux classiques à base de polyester, les films Mylar, les vinyles, le nylon, les caoutchoucs en silicone et les vernis standard pour bobinages de moteurs présentent des performances médiocres sous vide. Les polymères réticulés présents dans ces matériaux se dégradent, ce qui entraîne la désintégration physique de l'isolant.

La solution passe par des processus d'encapsulation exclusifs et des matériaux résistants aux rayonnements, appliqués dans le cadre d'une formule spatiale sur mesure. Dans bien des cas, les tests analytiques basés sur la nomenclature réelle permettent de prédire la TML et les CVCM sans nécessiter des mois de tests physiques sous vide, ce qui accélère nettement les délais de développement.

Résistance aux rayonnements

Les véhicules spatiaux sont constamment bombardés par des rayonnements gamma et neutroniques. Au fil du temps, ce rayonnement ionisant détruit les isolants électriques et les adhésifs standard.

- L'encapsulation du moteur doit être réalisée à l'aide de matériaux e-cap exclusifs et résistants aux rayonnements.
- Si les aimants au néodyme (Nd) standard peuvent suffire pour certaines applications, d'autres nécessitent des matériaux optimisés pour garantir une stabilité environnementale à long terme et le maintien des performances.
- Même si le choix des matériaux peut impliquer des contraintes supplémentaires en matière d'approvisionnement et de délais de fabrication, faire appel à un partenaire spécialisé dans le mouvement dès le début du processus de conception permet d'évaluer les compromis avant de finaliser le format de l'appareil.



L'un des risques souvent négligés liés au dégazage est que, même si le moteur est conforme à la norme, les autres composants du système ne le sont pas nécessairement. Kollmorgen collabore avec ses clients pour évaluer l'exposition au dégazage au niveau des systèmes, y compris avec des procédures d'encapsulation secondaire et d'étuvage pour les composants que nous ne fournissons pas.

Thermodynamique et cryogénie

La gestion thermique est le défi le plus sous-estimé dans la conception de systèmes de mouvement pour l'espace. En l'absence totale de refroidissement par convection, toute la chaleur générée par le moteur, y compris les pertes dans le cuivre et le fer, ainsi que le rayonnement solaire externe, doit être évacuée uniquement par conduction et rayonnement.

- **Extraction de chaleur :** Dans l'espace lointain, les engins spatiaux utilisent généralement des boucles de refroidissement liquide pour évacuer la chaleur du moteur vers les réseaux de radiateurs. Les moteurs doivent être méticuleusement dimensionnés en fonction de leur performance thermique réelle afin d'éviter toute défaillance de l'isolation.
- **Changement cryogénique :** historiquement, les sous-systèmes étaient chauffés artificiellement pour se maintenir à plus de $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$, car la science des matériaux ne permettait pas de garantir la survie sous ce seuil. Toutefois, les missions extraterrestres de prochaine génération (telles que celles qui visent à explorer la face cachée de la Lune) ciblent des températures ambiantes de $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Fatigue thermique :** l'amplitude thermique est tout aussi destructrice que le froid absolu. Les passages répétitifs du froid cryogénique à la chaleur rayonnée par le soleil provoquent une fatigue thermique extrême sur les boîtiers en aluminium, les stratifications en acier et les

enroulements en cuivre. Les systèmes d'isolation doivent être hautement spécialisés pour survivre à ces cycles violents de contraction et d'expansion sans se fracturer.

Chocs, vibrations et optimisation de la taille/du poids

Les systèmes de mouvement pour l'espace doivent être capables de résister à des forces de lancement intenses et à un fonctionnement de longue durée, tout en minimisant leur masse totale. Pour y parvenir, les ingénieurs doivent équilibrer de manière stratégique la durabilité structurelle, la performance et la fabricabilité.

- **Résilience au lancement :** les chocs et les vibrations subis lors du lancement peuvent compromettre l'intégrité des enroulements, la fixation des aimants et l'alignement mécanique avant même que le vaisseau spatial n'atteigne son orbite.
- **Réduction du poids :** chaque gramme ajouté à une charge utile augmente le coût de lancement et les besoins en carburant. Il est donc indispensable de fabriquer des actionneurs compacts et légers.
- **Compromis en matière de densité de couple :** la réduction de la taille et du poids ne peut pas se faire aux dépens de la performance ou de la fiabilité. Les systèmes de mouvement doivent toujours offrir le couple, la rigidité et la performance thermique requis par la mission.



Pourquoi choisir des moteurs sans boîtier ?

Dans le domaine spatial, tout composant pouvant être supprimé doit l'être. Les moteurs sans boîtier contribuent à simplifier les architectures de mouvement en éliminant les châssis, les arbres et les couplages inutiles, tout en permettant aux ingénieurs d'intégrer directement le moteur à la conception de l'actionneur.

Contrairement aux servomoteurs logés, les moteurs sans boîtier se composent uniquement du stator et du rotor. Cela offre aux ingénieurs davantage de flexibilité pour optimiser la structure environnante en fonction des exigences thermiques, mécaniques et environnementales propres à la mission.

Les architectures sans boîtier à entraînement direct présentent plusieurs avantages importants :

- réduction de l'encombrement et du poids grâce à la suppression des composants mécaniques superflus et à l'intégration compacte des actionneurs ;
- amélioration de la gestion thermique grâce à l'intégration du boîtier de l'actionneur lui-même dans le circuit de conduction thermique ;
- adaptabilité environnementale améliorée grâce à des stratégies d'étanchéité, de sélection des matériaux et d'atténuation de la contamination spécifiques à l'application ;

- une précision et une rigidité accrues grâce à la réduction du jeu et de la compliance au sein du système de mouvement ;
- des parcours de développement évolutifs qui assurent la continuité entre le prototypage au sol et les conceptions prêtes pour la mission.

Kollmorgen propose de multiples modèles de moteurs sans boîtier qui répondent à différentes priorités des applications spatiales. Les moteurs TBM et KBM sont couramment utilisés dans les articulations robotisées compactes, les cardans et les systèmes de positionnement de précision. Les moteurs TBM2G, quant à eux, sont optimisés pour une performance thermique accrue dans les conceptions soumises à des contraintes thermiques. Grâce à leur large gamme de tailles et à leur réputation éprouvée, les moteurs RBE sont parfaits pour les applications à couple élevé et à faible vitesse qui exigent une fiabilité à long terme.



Accélération du délai d'utilisation dans l'espace

Pour les équipes d'ingénieurs qui se lancent sur le marché spatial, le principe essentiel à retenir est que l'enveloppe mécanique validée au sol doit être exactement la même que celle qui sera envoyée dans l'espace. Pour cela, il faut disposer de l'architecture de moteur adéquate dès le premier jour.

1. Commencer sur Terre, penser du point de vue architectural

L'approche la plus efficace consiste à commencer par des moteurs sans boîtier standard de qualité commerciale (comme ceux des gammes Kollmorgen TBM ou KBM) afin de construire des prototypes physiques, de cartographier les profils de couple et de vitesse, et de finaliser l'encombrement structurel en quelques semaines, et ce, pour une fraction du coût du matériel construit sur mesure pour l'espace. L'essentiel est de choisir une gamme de moteurs offrant une évolutivité bien établie.

2. Concevoir en collaboration la « formule spatiale »

Une fois que le format et la performance électromagnétique sont validés sur terre, des spécialistes du contrôle du mouvement collaborent avec les équipes d'ingénierie du constructeur pour appliquer la « formule spatiale » adéquate. Cela peut impliquer le recours à des types d'aimants spécifiques, à des systèmes d'isolation résistants aux rayonnements et à des encapsulages à faible dégazage, tout en préservant l'architecture de base du moteur et son encombrement mécanique. Les équipes d'ingénieurs peuvent réduire les efforts de reconception et accélérer le passage du prototypage au sol à des systèmes opérationnels tout en conservant la géométrie des actionneurs et leurs points d'intégration.

3. Atténuation au niveau du système

Même s'ils ne participent pas au développement de la plateforme, les partenaires experts du mouvement peuvent proposer des stratégies d'atténuation au niveau du système. Chez Kollmorgen, par exemple, nous fournissons des conseils sur les techniques d'encapsulation secondaire au sein du boîtier de l'actionneur et sur la mise en place de procédures spécifiques « d'étuvage » thermique visant à forcer le dégazage sur Terre, avant même que le système ne soit chargé à bord d'un lanceur. C'est là que l'intérêt d'un modèle « d'ingénieur à ingénieur » prend tout son sens. L'objectif est d'aider les équipes à réduire les risques liés aux décisions de conception avant qu'ils ne se transforment en problèmes critiques pour la mission.



Le délai de livraison habituel pour un prototype est de 2 à 3 semaines pour les moteurs sans châssis standard (50 à 115 mm) et de 12 à 20 semaines pour les systèmes terrestres plus grands et sur mesure.

Un modèle de co-ingénierie conçu pour le marché spatial actuel

Deux philosophies d'ingénierie distinctes se dessinent sur le marché spatial. La première est celle des ingénieurs OEM traditionnels, forts de nombreuses années d'expérience, qui agissent de manière réfléchie et mesurent pleinement le coût d'un échec de mission. À l'opposé, on trouve les équipes des entreprises commerciales et des start-ups, qui agissent rapidement, développent des prototypes de manière intensive et adoptent une mentalité axée sur l'apprentissage par l'échec (« fail-forward »). Kollmorgen propose un parcours rapide allant du prototype à la mise en orbite et s'appuie sur plus de 60 ans d'expérience en co-ingénierie et en validation documentée des matériaux pour soutenir ces deux approches.



Réalités conceptuelles et compromis

En matière de conception du mouvement destiné à l'espace, chaque décision a une incidence sur la suivante. Voici quelques-uns des défis courants auxquels les équipes sont confrontées, ainsi que les approches recommandées pour planifier à l'avance et accélérer le déploiement.

Défi	Stratégie recommandée
Recherche d'un moteur commercial « certifié pour l'espace »	Recherchez des architectures adaptées à l'espace pouvant être optimisées grâce à une « formule spatiale » sur mesure. Chaque mission présente des exigences spécifiques en matière de gestion thermique, de rayonnement et de vide, et le système de mouvement doit être capable de répondre aux besoins particuliers de chaque application.
Sous-estimer le froid cryogénique	Ne supposez pas que les matériaux standard résisteront à des cycles thermiques dynamiques jusqu'à -200 °C sans validation préalable. Le froid cryogénique profond est le mode d'échec le plus fréquemment sous-estimé dans la conception de systèmes de mouvement pour l'espace.
Surdimensionnement technique pour les orbites terrestres basses (LEO)	L'application des normes relatives aux rayonnements et au dégazage en espace lointain à un satellite destiné à une mission de quatre ans en orbite terrestre basse (LEO) entraîne une augmentation considérable des coûts et des frais d'ingénierie non récurrents (NRE). Adaptez la formule à la durée et au domaine de la mission.
Négliger la gestion thermique jusqu'à un stade avancé de la conception	Puisqu'il n'y a pas de refroidissement par convection dans l'espace, l'évacuation de la chaleur doit constituer un élément clé à prendre en compte lors de la conception. Dimensionnez le moteur pour la performance thermique dès le début et planifiez très tôt la boucle de refroidissement liquide.
Choisir un prototype de moteur terrestre non évolutif	Choisissez une gamme de moteurs offrant une évolutivité éprouvée. L'enveloppe mécanique que vous validez sur Terre doit être la même que celle qui sera envoyée dans l'espace.

Conçu pour la mission

L'économie spatiale connaît une croissance plus rapide que celle de la main-d'œuvre qui la soutient. Les programmes passent de cycles de développement s'étalant sur plusieurs décennies à des itérations rapides. La pression économique est réelle. Le délai entre la phase de prototypage et la mise en production ne cesse de se raccourcir. Les décisions judicieuses prises dès le début concernant le système de mouvement profitent à l'ensemble du programme : elles évitent les reprises, réduisent les coûts d'ingénierie non récurrents (NRE) et accélèrent la mise en orbite.

Fort de plus de 60 ans d'expertise dans ce domaine et d'architectures de moteurs sans boîtier qui ont fait leurs preuves, Kollmorgen propose une gamme complète de solutions durables pour l'alimentation, la transmission et le contrôle du mouvement. Nous travaillons en étroite collaboration avec votre équipe d'ingénieurs pour vous aider à maîtriser les défis liés à l'innovation rapide, à la gestion thermique de précision et à la fabrication hautement évolutive. Nous savons qu'il n'y a pas de marge d'erreur et nous sommes là pour contribuer à trouver la formule spatiale appropriée pour le succès de la mission.

Prêt pour le lancement ?

[Contactez Kollmorgen](#) pour discuter de vos besoins et de vos objectifs avec un spécialiste des moteurs sans boîtier Kollmorgen.

À propos de Kollmorgen

Kollmorgen, une marque Regal Rexnord, possède plus d'un siècle d'expérience dans le domaine du mouvement. Cette expérience se retrouve dans les performances et la fiabilité inégalées de ses moteurs et de ses variateurs, ainsi que dans ses solutions de contrôle et ses plateformes d'automatisation pour les véhicules autonomes. Nous proposons des solutions innovantes qui allient performances exceptionnelles, fiabilité et facilité d'utilisation, offrant ainsi aux constructeurs de machines un avantage concurrentiel indéniable.